

УДК 550.388.2

## ЧАСТОТНЫЕ СВОЙСТВА КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ БИЕНИЙ НА АЧХ СРЕДНЕШИРОТНОГО СЛОЯ Es

*А.Д. Акчурин, К.М. Юсупов*

### Аннотация

На ионозонде в г. Казани были выполнены продолжительные наблюдения отражений от слоя Es с минутной периодичностью. На части частотной зависимости амплитуды отражений обнаружены глубокие квазипериодические вариации, напоминающие интерференционные биения. Разработанная новая форма представления данных позволила определить частотные свойства диапазона биений и вероятности появления слоя Es в зависимости от структурных особенностей отражения. Интерференционные биения начинаются с  $\sim 4$  МГц днем и с  $\sim 2$  МГц ночью, при этом имеют протяженность 0.5–2.5 МГц. С ростом частоты расстояния между минимумами увеличиваются от  $\sim 30$  до  $\sim 700$  кГц. Найдены вероятности появления отражений от слоя Es в зависимости от структуры отражения.

**Ключевые слова:** вертикальное зондирование ионосферы, слой Es, амплитудно-частотные характеристики, квазипериодические биения на следах Es, интерференция магнитных компонент, структурные особенности отражений от слоя Es,  $f$ -график, A-карта.

---

### Введение

Для выяснения природы происхождения спорадического слоя E часто исследовались амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) отражений от слоя Es, получаемые при вертикальном зондировании ионосферы. В предположении вертикальности диаграммы направленности антенн АЧХ-слой представляет собой частотную зависимость коэффициента отражения слоя. Основное внимание исследователей, естественно, было сконцентрировано на диапазоне полупрозрачности как на главной особенности слоев Es [1].

Самым простым объяснением полупрозрачности спорадического слоя E является облачная модель, которая связывает частоту экранирования ( $f_{bEs}$ ) и критическую частоту ( $f_{oEs}$ ) с плазменными частотами фоновой ионизации и сгущений электронных плотностей, вложенных в нее. Такие облака с высокой электронной концентрацией наблюдались с помощью радара некогерентного рассеяния [2, 3]. Сравнение этих результатов с одновременными наблюдениями на ионозонде позволило установить, что пространственное изменение пиковой плазменной частоты соответствует диапазону полупрозрачности  $\Delta f_b = f_{oEs} - f_{bEs}$ .

В основе второго возможного механизма возникновения полупрозрачности лежит рассеяние на мелкомасштабных неоднородностях. В этой модели частота экранирования определяется максимальной плазменной частотой, и частичное отражение на более высоких частотах вызвано рассеянием от небольших неоднородностей внутри слоя. Для объяснения широкого диапазона полупрозрачности это наиболее вероятный механизм [4].

Третий возможный механизм, предложенный в работах [5–10], предполагает, что даже в отсутствие мелко- или крупномасштабных неоднородностей слой Es

мог стать полупрозрачным (при наличии крутого градиента электронной концентрации) из-за взаимодействия магнитоионных компонент. Согласно этому механизму прохождение через слой падающей обыкновенной волны ( $o$ -моды) имеет место через промежуточное распространение в виде необыкновенной волны ( $z$ -моды). В таком случае диапазон полупрозрачности с шириной порядка половины гирочастоты электронов расположен ниже максимальной плазменной частоты. В подтверждении этой теории говорят результаты измерений коэффициента отражения слоя Es на высоких широтах [11]. На этих широтах взаимодействие мод будет существенным при близком направлении вертикального волнового вектора к конусу взаимодействия.

Наряду с исследованиями ширины полупрозрачности изучались вариации АЧХ в диапазоне полупрозрачности [12, 13]. Так, в ряде случаев наблюдались квазипериодические биения на АЧХ, объясняемые третьим механизмом возникновения полупрозрачности с помощью взаимодействия двух обыкновенных волн. На основе метода полного волнового анализа выполнено моделирование процесса интерференции. Такая усовершенствованная модель «простого» тонкого слоя, допускающая биения, была названа тонким слоем с взаимодействием мод [11].

С помощью данной модели объяснены такие наблюдаемые свойства интерференционных биений на высоких широтах, как:

- 1) уменьшение расстояния между последовательными интерференционными минимумами с ростом частоты зондирования;
- 2) уменьшение глубины биений с ростом частоты зондирования;
- 3) ограничение расстояния между интерференционными максимумами величиной 0.3 МГц.

Основные работы, посвященные исследованию АЧХ в области возможной полупрозрачности, проводились до 90-х годов XX века. Более поздние работы в этом направлении неизвестны. В настоящей работе продолжено исследование особенностей квазипериодических биений на АЧХ слоя Es.

## 1. Аппаратура и методика эксперимента

Для изучения особенностей АЧХ слоя Es с февраля по ноябрь 2010 г. под г. Казанью были выполнены измерения с помощью ионозонда «Циклон». Проведенная модернизация системы управления ионозондом «Циклон» [14] позволяет производить зондирование ионосферы в учащенном режиме, необходимом для исследования малоизученных быстроменяющихся во времени процессов в ионосфере. Ввиду того что скорость изменчивости ионосферы может меняться в широком диапазоне, был установлен режим с максимальной для нашего ионозонда частотой съема ионограмм (1 ионограмма в минуту, или 1440 ионограмм в сутки). Частота зондирования изменялась от 1 до 7.4 МГц за 20 с (верхнюю границу частоты зондирования немного изменяли в зависимости от времени года), диапазон частотной развертки составлял 400 частот с равным шагом, частота повторения импульсов – 20 Гц, длительность зондирующего импульса – 70 мкс. Антенная система представляла собой одну пару скрещенных дельта-антенн (одна работала на излучение, другая – на прием).

## 2. Данные экспериментов и их обработка

В течение указанного выше интервала времени зарегистрировано и обработано около 100000 ионограмм. Наблюдались слои Es следующих четырех типов:  $f$  (float, плоский),  $l$  (low, низкий),  $c$  (cuspr, с рождом),  $h$  (hight, высокий).

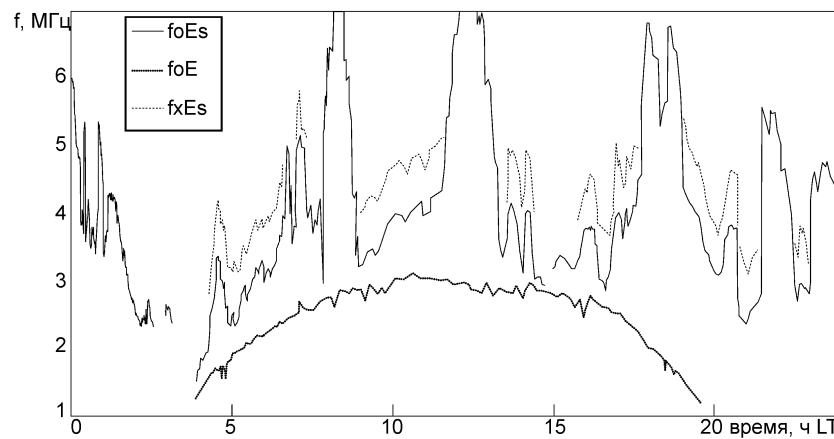


Рис. 1. Вариации ионосферных параметров  $f_{oE}$ ,  $f_{oEs}$ ,  $f_{xEs}$  с минутным шагом (20 мая 2010 г.)

Сначала были исследованы вариации параметров:  $f_{oE}$  (критическая частота обыкновенной волны слоя E),  $f_{oEs}$  (предельная частота обыкновенной волны слоя Es),  $f_{xEs}$  (предельная частота необыкновенной волны слоя Es),  $f_{tEs}$  (предельная частота отражений от слоя Es),  $f_{bEs}$  (частота экранирования),  $\Delta f_{bEs} = f_{tEs} - f_{bEs}$  (диапазон полупрозрачности) и  $h'Es$  (действующая высоты отражения). Руководство URSI [15, 16] по интерпретации ионограмм рекомендует представлять суточные изменения данных частотных характеристик слоев ионосферы в виде  $f$ -графика. На рис. 1 приведен типичный график, построенный с помощью программного обеспечения ионозонда [17, 18].

График демонстрирует общеизвестные факты о поведении критических частот слоя E и предельных частот слоя Es:

- 1) увеличение  $f_{oE}$  от восхода солнца до полудня и последующее уменьшение к закату;
- 2) отсутствие в ночные часы отражений от слоя E в диапазоне частот больше 1 МГц;
- 3) нерегулярный характер  $f_{oEs}$  ( $f_{xEs}$ );
- 4) при наличии отражения  $x$ -моды кривая  $f_{xEs}$  расположена выше кривой  $f_{oEs}$  на величину половины гирочастоты электронов ( $f_H/2 \approx 0.7$  МГц).

Отмеченное положение кривой  $f_{xEs}$  относительно  $f_{oE}$  пригодится далее для пояснения новой формы представления данных.

Изменения частотных параметров часто сопровождалось квазипериодическими изменениями амплитуд следов Es вдоль оси частот, похожими на интерференционные биения. Пример одной из таких ионограмм приведен на рис. 2, а. Для изучения такой тонкой структуры отражений слоев ионосферы необходимо детально изучить вариации АЧХ. В настоящей работе при обработке ионограмм графики АЧХ строились программой автоматически на основе максимумов амплитуд отраженных сигналов (по одному максимуму на каждой частоте в указанном в программе высотном интервале). Для выделения АЧХ слоя Es использовался интервал высот 90–150 км. Понятно, что в этот интервал попадали отражения не только от слоя Es, но и от слоя E. Поскольку при такой обработке точное разделение следов E и Es на АЧХ невозможно, они не разделялись друг от друга, образуя одну общую АЧХ.

На рис. 2, а приведены ионограммы и АЧХ слоев E и Es с помощью двух способов представления. Первый способ – традиционный 2D-график АЧХ слоев E и Es

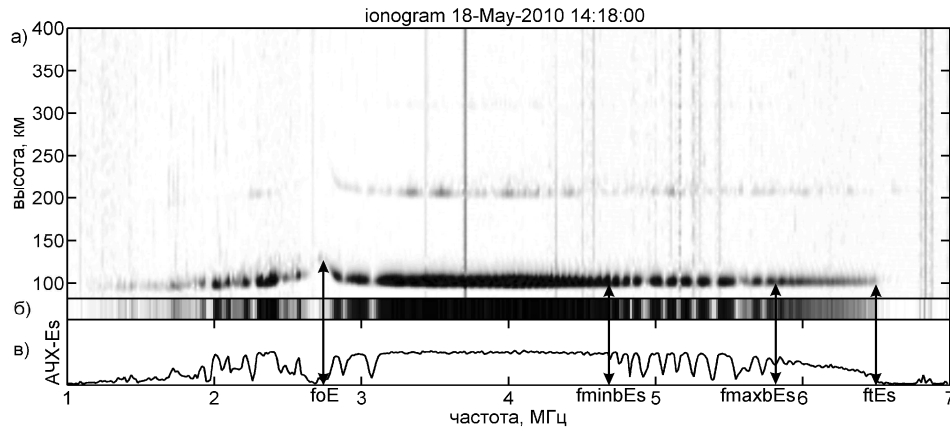


Рис. 2. Пример ионограммы и АЧХ, свидетельствующий о квазипериодических вариациях амплитуд следа Es в диапазоне частот  $\sim 4.7\text{--}5.9$  МГц: а) ионограмма, б) АЧХ слоя Es на основе цветовой шкалы амплитуд, в) – традиционная АЧХ слоя Es

(рис. 2, в) – удобен для исследования АЧХ одного след, а второй – представление АЧХ слоев E и Es в виде 3D-карты (с фиктивной вертикальной координатой), когда амплитуды отражений изображены на основе цветовой шкалы (рис. 2, б). Последний способ позволяет собрать большое количество АЧХ слоев в полноценную 3D-карту. Интерференционные биения на такой карте будут проявлять себя в виде чередования цветных полос (темных и светлых полос при изображении в градациях серого) вдоль оси частот. Далее все цветные картинки будут изображены в градациях серого.

Предельные (для слоя Es) и критические (для слоя E) частоты на АЧХ (рис. 2, в) отмечаются падениями амплитуд отраженных сигналов от слоев Es и E. Как видно из рисунка, критическая частота слоя E соответствует значению  $\sim 2.7$  МГц, а предельная частота Es равна  $\sim 6.5$  МГц.

Исследования ионограмм с биениями на АЧХ слоя Es показали, что частотный диапазон биений смещается по частоте и изменяет свою протяженность. Поэтому для описания диапазона биений удобно ввести частотные границы  $f_{\min bEs}$  (начальная частота биений) и  $f_{\max bEs}$  (конечная частота биений), а сам диапазон биений определить как  $\Delta f_{beatEs} = f_{\max bEs} - f_{\min bEs}$ . Для ионограммы на рис. 2  $f_{\min bEs} \approx 4.7$  МГц,  $f_{\max bEs} \approx 5.9$  МГц и  $\Delta f_{beat} \approx 1.2$  МГц.

Иногда в частотном диапазоне биений слоя Es видны отражения от вышележащих слоев ионосферы. Часто конечная частота биений равна предельной частоте, а начальная – частоте экранирования. В таких случаях диапазон биений одновременно является и диапазоном полупрозрачности ( $\Delta f_{bEs} \approx \Delta f_{beatEs}$ ).

Перейдем теперь к 3D-представлению последовательности АЧХ. Для изучения биений на АЧХ  $f$ -график не является показательным, а ручным способом выделить ионограммы с такими свойствами слоя Es не представляется возможным. Это заставило искать новую форму представления данных. На рис. 3, а приведена пояснительная схема образования новой формы представления данных в виде 3D-карты, демонстрирующей последовательность пяти АЧХ (таких, как на рис. 2, б, в) слоя Es (20 мая 2010 г. в период времени с 18:20 по 18:24 ч LT). Последовательность АЧХ на основе цветовой шкалы амплитуд показана на рис. 3, б. В данный период для всех АЧХ наблюдаются следующие значения частотных параметров слоя Es:  $f_{tEs} \approx 6.5$  МГц,  $f_{\min bEs} \approx 3.4$  МГц,  $f_{\max bEs} \approx 5.5$  МГц и  $\Delta f_{beatEs} \approx 2.1$  МГц.

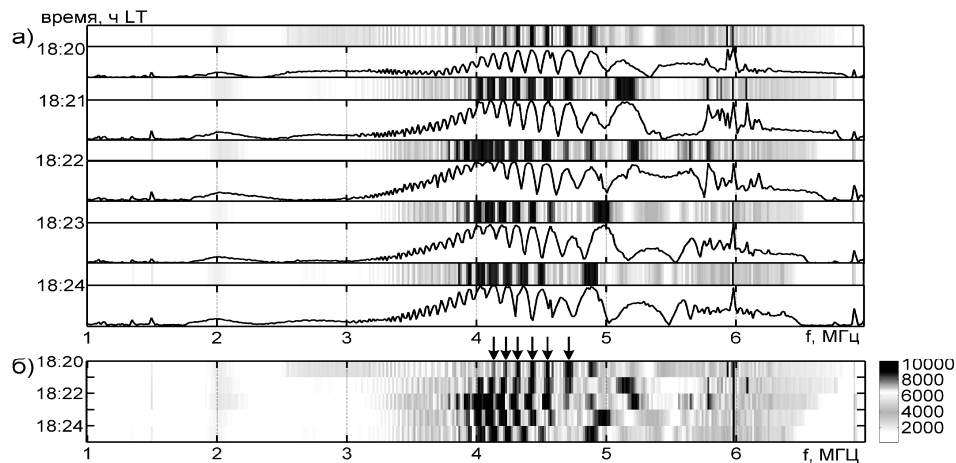


Рис. 3. Пояснительная схема составления 3D-карты (вариаций АЧХ) слоя Es 20 мая 2010 г. с 18:20 по 18:24 ч LT (МДВ): а) обычные графики АЧХ; б) 3D-карта на основе цветовой шкалы амплитуд

В отношении интенсивных слоев Es принято считать, что в течение интервала времени  $\sim 5$  с отражающие свойства слоя остаются неизменными [1]. Слой Es со свойствами рассеяния изменяется со значительно большей скоростью, но такие следы здесь не рассматриваются. Время между последовательными АЧХ (ионограммами) составляет 1 мин, и тем не менее относительное положение отдельных максимумов (минимумов) в диапазоне биений слабо смещается по частоте, формируя темные (светлые) «треки» (на рис. 3, б указаны стрелками). Поэтому можно считать, что интервал устойчивости области E (в данный период времени) большим 1 мин; это позволяет изучать свойства интерференционной картины с минутным шагом по времени.

АЧХ, собранные в течение целого дня измерений с минутным шагом регистрации ионограмм, образуют 3D-карту в координатах амплитуда – время – частота (далее для краткости просто А-карта). На рис. 4 изображены изменения АЧХ, содержащие только сигналы отражений слоев E и Es. Для более быстрого понимания изображения на А-карте удобно сравнить ее с  $f$ -графиком (рис. 1). Ввиду отсутствия разделения магнитоионных компонент при приеме на ионограммах (и на АЧХ) также присутствуют следы  $x$ -компоненты. Обычно амплитуды отражений  $x$ -моды меньше амплитуд  $o$ -моды, а начальная частота  $x$ -следа выше  $o$ -следа на половину гирочастоты электронов, поэтому на А-карте  $x$ -следы заметны как светлые «тени» (стрелки на рис. 4), сдвинутые на половину гирочастоты электронов относительно более темных  $o$ -следов.

Серия АЧХ слоев Es, имеющих схожий вид в течение 10–60 мин, образуют на А-карте различные области с общей структурой и соответствуют трем основным формам отражения:

- 1) слой Es со свойствами рассеяния на неоднородностях (области 1 и 7), характеризующиеся беспорядочными вариациями амплитуд на АЧХ;
- 2) слой Es без биений (области 4 и 5), у которых амплитуда АЧХ растет в начале следа, имеет примерно равные значения в середине следа и спадает к концу следа. Частотная протяженность таких следов меньше гирочастоты электронов;
- 3) слой Es с квазипериодическими вариациями амплитуд (области 2, 3, 6 и 8) в диапазоне биений на А-карте, образующие узор из вьющихся параллельных полос. Частотная протяженность этих слоев больше гирочастоты электронов.

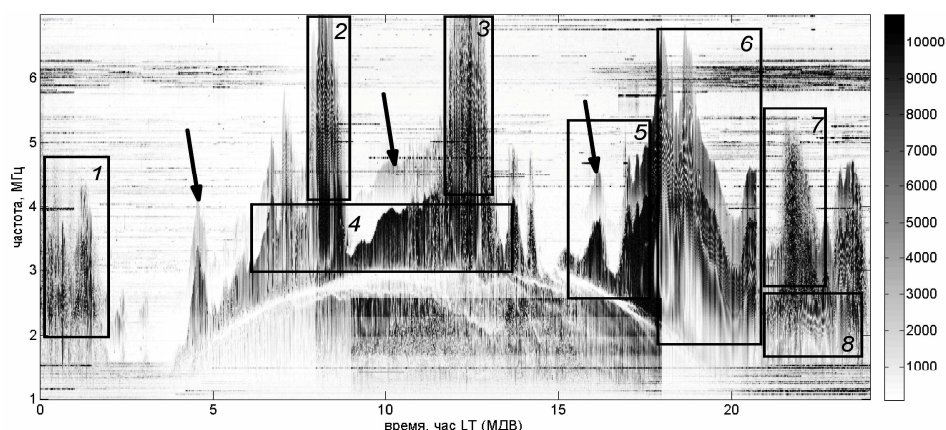


Рис. 4. Пример А-карты (суточных вариации АЧХ слоев Е и Es, 20 мая 2010 г.) в координатах амплитуда – время – частота. Цифрами в прямоугольниках обозначены слои Es с различными структурными особенностями отражений: 1, 7 – рассеяние на Es неоднородностях; 4, 5 – слои без биений на АЧХ; 2, 3, 6, 8 – слои с биениями на АЧХ. Стрелками показаны некоторые из следов необыкновенной компоненты

Используя А-карты, несложно определить как полную вероятность появления отражений от слоя Es (PEs), так и условную долю слоев Es с какой-либо структурной особенностью по отношению ко всем случаям появления Es. Кроме того, они позволяют для слоев с квазипериодическими биениями определить границы диапазона биений и продолжительность непрерывного существования отражений от слоя Es.

### 3. Вероятность появления отражений от слоя Es

Полная вероятность PEs характеризует вероятность существования отражений от спорадического слоя (без учета отражающих свойств) и определяется как отношение числа измерений, в которых присутствуют сигналы от слоя Es, к общему числу измерений (в %) [19]. Этот параметр имеет важное значение для прогнозирования линий радиосвязи и для выяснения природы спорадических слоев в области E.

Чтобы выяснить, насколько часто появляются слои Es с биениями, были определены условные вероятности, учитывающие структурные особенности отражений. На рис. 5 показано изменение как полной, так и условных вероятностей существования отражений от слоя Es за июнь 2010 г. в процентах, так как в этот месяц наблюдается наибольшая вероятность появления отражений от слоя Es со среднемесячным значением  $\sim 82\%$ . Из условных вероятностей наибольшей является вероятность наблюдения слоев Es со свойствами рассеяния на мелкомасштабных неоднородностях со среднемесячным значением  $\sim 73\%$ . Вероятность появления слоев Es без биений равна примерно 15%, а с биениями – 12%. Как видно из гистограммы, следы Es с квазипериодическими биениями – достаточно частое явление, наблюдаемое почти каждый день, в некоторые дни вероятность достигает значения  $\sim 25\%$ .

Регистрация ионограмм со стандартным 15 минутным интервалом не позволила бы определить приведенные выше статистические параметры, так как за этот интервал времени отражающая способность слоя Es может резко измениться. И только регистрация ионограмм с минутным шагом позволила определить не только вероятности появления слоя Es, но и зависимость частотной границы диапазона биений от времени суток.

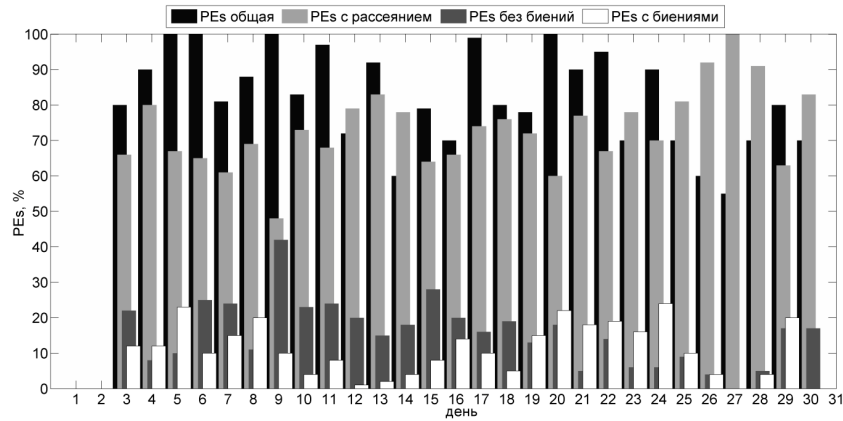


Рис. 5. Полная и условные вероятности появления отражений от слоя Es за июнь 2010 г. в зависимости от его структуры отражений

#### 4. Границы диапазона биений

С помощью А-карты определены продолжительность устойчивой картины биений и зависимость от времени суток частотного диапазона биений. Продолжительность устойчивой картины биений от слоя Es варьируется от  $\sim 10$  мин до  $\sim 5$  ч.

Установлено, что квазипериодические биения амплитуд следа возникают только тогда, когда наблюдаемая частотная протяженность следа Es больше половины гирочастоты электронов (для следов без рассеяния). Расположение же частотного диапазона биений в дневные и ночные часы различается. Начальная частота биений зависит от типа слоя Es. Конечная частота биений равна примерно предельной частоте слоя Es. Независимо от величины  $f_{\min bEs}$  для слоев типов  $f$ ,  $c$ ,  $l$  и  $h$  в диапазоне биений на АЧХ наблюдается увеличение частотного расстояния между последовательными минимумами с ростом частоты зондирования.

В дневные часы, когда присутствуют отражения от слоя E, биения на следах Es наблюдаются на частотах выше  $\sim 4$  МГц. Для слоев Es типов  $f$ ,  $h$ ,  $l$  (плоские слои) начальная граница биений определяется равенством

$$f_{\min bEs} \approx f_{\min Es} + f_H/2, \quad (1)$$

где  $f_{\min Es}$  – начальная граница отражений  $o$ -моды слоя Es. Конечная частота биений всегда находится на удалении  $f_H/2$  от  $f_{tEs}$  и определяется как

$$f_{\max bEs} \approx f_{oEs}. \quad (2)$$

Для слоя Es типа  $c$  начальная частота биений будет отличаться от предыдущих плоских слоев потому, что низкочастотный конец этого слоя образует рожок (наклонные стрелки на рис. 6) с повышенной действующей высотой отражения по отношению к плоской части слоя [15, 16, 19]. Рожок  $x$ -следа Es типа  $c$  не регистрируется в большинстве случаев, когда частотная протяженность  $o$ -следа Es больше половины гирочастоты электронов ( $o$ -след экранирует рожок  $x$ -следа). В редких случаях рожок  $x$ -моды заметен, пример такой ионограммы приведен на рис. 6. Обычно частотная протяженность от верхней точки рожка до нижней (до начала плоской части) следа Es типа  $c$  равна примерно половине гирочастоты электронов. С ростом частоты зондирования, когда рожок  $x$ -следа начинает «соприкасаться» с плоской частью  $o$ -следа с верхней стороны  $o$ -следа Es (то есть в хвостовой части радиоимпульсов), начинают появляться биения. Увеличенный фрагмент с такими

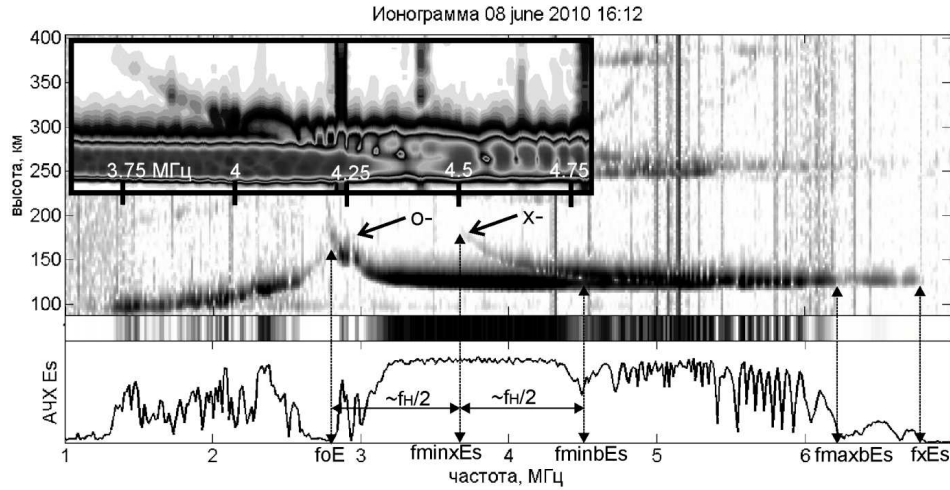


Рис. 6. Пример ионограммы, содержащей как биения на АЧХ, так и рожек  $x$ -следа слоя Es типа  $c$ . На вставке в левом верхнем углу показан увеличенный фрагмент ионограммы места слияния рожек  $x$ -следа Es с  $o$ -следом

биениями приведен на вставке в левом верхнем углу на рис. 6. С увеличением частоты зондирования на величину  $\sim f_H/2$  следы  $o$ - и  $x$ -мод «сливаются», и биения наблюдаются по всей толщине следа Es. Поэтому начальная частота биений у слоя Es типа  $c$  отличается от частот слоев типов  $f$ ,  $h$ ,  $l$  на величину  $\sim f_H/2$  и равна

$$f_{\min bEs} \approx f_{oE} + f_H/2 + f_H/2 = f_{oE} + f_H. \quad (3)$$

В ночные часы отражения от фоновой ионизации отсутствуют, регистрируемые слои Es плоские. Биения в это время наблюдаются в диапазоне частот от  $\sim 2$  до  $\sim 4$  МГц. Граница начала биений в ночное время определяется с помощью выражения:

$$f_{\min bEs} \approx f_{\min} + f_H/2, \quad (4)$$

где  $f_{\min}$  – минимальная частота отражений от ионосферы [15, 16]. Ночью в большинстве случаев выше частоты  $\sim 4$  МГц наблюдается рассеяние на неоднородностях (см. рис. 4, области 7; 8).

В часы восхода (заката) Солнца одновременно с увеличением (уменьшением) критической частоты слоя E, наблюдается увеличение (уменьшение) начальной частоты биений слоя Es (величина  $f_{\min bEs}$  как бы перемещается «в такт» с  $f_{oE}$ , см. рис. 4 область 6). В это время начальная частота биений располагается в диапазоне частот  $2 \text{ МГц} < f_{\min bEs} < 4 \text{ МГц}$ .

### Заключение

В период февраль–ноябрь 2010 г. под г. Казанью проводилось зондирование ионосферы в учащенном режиме (1 ионограмма в минуту). Зарегистрировано около 100000 ионограмм. Регистрация ионограмм с минутной периодичностью позволила обнаружить квазипериодические биения на АЧХ слоя Es и определить их свойства. Проведен анализ статистики появления слоя Es в зависимости от структуры отражения. В июне 2010 г. при среднемесячной полной вероятности появления отражений от слоя Es, равной  $\sim 82\%$ , наибольшая условная вероятность  $73\%$



наблюдается у слоя Es со свойствами рассеяния на мелкомасштабных неоднородностях. Вероятность появления слоя Es без биений составила 15%, а с биениями – 12%.

Предложенная новая форма представления (*A*-карта, рис. 4) позволила определить продолжительность устойчивой картины биений, свойства диапазона биений от типа слоев Es и времени суток:

1) продолжительность устойчивой картины биений от слоя Es варьируется от ~10 мин до ~5 ч в летние месяцы;

2) для слоев Es типов *f*, *l* и *h* биения возникают только тогда, когда наблюдаемая частотная протяженность следа Es больше половины гирочастоты электронов. Для слоев Es типа *c* частотная протяженность должна быть больше гирочастоты электронов (из-за наличия рожка на следе);

3) расположение частотного диапазона биений в дневные часы отличается от ночных часов и зависит от наличия фоновой концентрации слоя E. Биения начинаются с ~4 МГц днем и с ~2 МГц ночью;

4) протяженность диапазона биений на следах Es изменяется в диапазоне частот 0.5–2.5 МГц;

5) частотные расстояния между последовательными минимумами на АЧХ слоев Es увеличиваются с ~30 (на начальной границе биений) до ~700 кГц (на конечной границе биений).

Установленное увеличение частотного расстояния между последовательными минимумами на АЧХ слоев Es не соответствует свойствам биений двух обыкновенных компонент, вытекающим из теории взаимодействующего тонкого слоя [6].

С учетом найденной связи начальной границы диапазона биений на АЧХ слоев Es и критической частоты слоя E с гирочастотой электронов биения на следах Es могут быть объяснены интерференцией между обыкновенной и необыкновенной компонентами.

### Summary

*A.D. Akchurin, K.M. Yusupov.* Frequency Properties of the Quasiperiodic Variations of Midlatitude Es Layer Traces Amplitude.

In the present work, we report about long-term measurements of echoes from Es layer performed using ionosonde in Kazan with 1 minute period of ionogram registration. Deep quasiperiodic variations resembling interference beats at certain frequency range in amplitude of echoes from Es layer were observed. A new form of data presentation was introduced, which allowed not only to display clearly the critical frequencies of ionospheric layers, but also to demonstrate the fine structure of ionospheric layers. The beats appeared at 4 MHz in the afternoon and at 2 MHz at night, and had an extent in the frequency range of ~0.5–2.5 MHz. As the sounding frequency increased, the distance between the minima increased from 30 to 700 kHz. Occurrence probabilities of echoes from Es layer were determined depending on structural features of the reflection.

**Key words:** vertical sounding of ionosphere, Es layer, amplitude-frequency characteristics, quasiperiodic variations of Es layer traces amplitude, interference of magnetoionic components, structural features of Es layer reflections, f-plot, ATF-plot.

### Литература

1. *Chessell C.I., Thomas J.A., Bourne I.A.* Experimental observations of the amplitudes of Es and F-region reflections and their comparison with the thin-layer model for Es // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1973. – V. 35. – P. 545–561.
2. *Miller K.L., Smith L.G.* Horizontal structure of midlatitude sporadic E layers // *Radio Sci.* – 1975. – V. 10. – P. 271–276.

3. *Miller K.L., Smith L.G.* Incoherent scatter radar observations of irregular structure in mid-latitude sporadic E layers // J. Geophys. Res. – 1978. – V. 83. – P. 3761–3775.
4. *Miller K.L., Smith L.G.* Reflection of radio waves by sporadic-E layers // J. Atmos. Terr. Phys. – 1977. – V. 39. – P. 899–911.
5. *Chessel C.I.* The numerical calculation of reflection and transmission coefficients for thin highly ionised layers including the effect of the Earth's magnetic field // J. Atmos. Terr. Phys. – 1971. – V. 33. – P. 1515–1532.
6. *Chessel C.I.* Results of numerical calculation of reflection and transmission coefficients for thin highly ionised layers and their application to sporadic-E reflections // J. Atmos. Terr. Phys. – 1971. – V. 33. – P. 1803–1822.
7. *Budden K.G.* Radio waves in the ionosphere. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1961. – 542 p.
8. *Davies K.* Ionospheric Radio. – London: Peter Peregrinus, 1990. – 580 p.
9. *Дэвис К.* Радиоволны в ионосфере. – М.: Мир, 1973. – 504 с.
10. *Nygren T.* A simple method for obtaining reflection and transmission coefficients and fields for an electromagnetic wave in a horizontally stratified ionosphere // J. Planet. Space Sci. – 1981. – V. 29, No 5. – P. 521–528.
11. *Turunen T., Nygren T., Jalonen L.* Observations of the reflection coefficient of the sporadic E-layer at high latitudes // J. Atmos. Terr. Phys. – 1980. – V. 42. – P. 147–154.
12. *Jalonen L.* Quasi-periodic frequency dependence of Es- and E-layer echo amplitudes caused by mode coupling // J. Atmos. Terr. Phys. – 1981. – V. 43. – P. 1285–1288.
13. *Шерстюков О.Н.* Отражающая способность среднеширотного спорадического слоя E: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Казань, 1989. – 200 с.
14. *Акчурин А.Д., Юсупов К.М.* Система управления ионозонда «Циклон» // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. Сер. «Информатика. Телекоммуникации. Управление». – 2010. – Вып. 5(108). – С. 49–56.
15. *Пиггот В.Р., Равер К.* Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм / Пер. с англ. под ред. Н.В. Медниковой. – М.: Наука, 1977. – 342 с.
16. *Piggott W.R., Rawer K.* URSI Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction. – N. Y.: Elsevier, 1972. – 325 p.
17. *Зыков Е.Ю., Акчурин А.Д., Сапаев А.Л., Шерстюков О.Н.* Автоматическая интерпретация ионограмм вертикального зондирования // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2008. – Т. 150, кн. 3. – 2008. – С. 36–45.
18. *Зыков Е.Ю., Акчурин А.Д., Сапаев А.Н., Шерстюков О.Н.* Автоматическая интерпретация ионограмм автоматического зондирования // Электр. журн. «Исследовано в России». – 2007. – № 10. – С. 52–64.
19. *Чавдаров С.С., Часовитин Ю.К., Чернышева С.Л., Шефтель В.М.* Среднеширотный спорадический слой E ионосферы. – М.: Наука, 1975. – 120 с.

Поступила в редакцию  
20.12.10

---

**Акчурин Адель Джавидович** – кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой радиоастрономии Института физики Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: [adel.akchurin@ksu.ru](mailto:adel.akchurin@ksu.ru)

**Юсупов Камил Маратович** – младший научный сотрудник кафедры радиоастрономии Института физики Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: [Kamil.Usupov@ksu.ru](mailto:Kamil.Usupov@ksu.ru)